E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 8, Number 1, 2022

The effect of surface roughness on 1050 aluminum alloy weld profile welded by pulsed Nd:YAG laser

M. Foumani, H. Naffakh-Moosavy*, A. Rasouli, H. Aliyari

Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Received 10 March 2022 ; Accepted 3 July 2022

Abstract

Surface roughness in the welding processes is one of the important parameters in the laser welded metal connections which affects laser beam absorption directly. When the laser beam is irradiated to the surface of the base metal, the surface roughness plays an important role in the amount of beam absorption and the amount of melting achieved and directly affects the penetration depth. The main purpose of this study is to investigate the effect of roughness mentioned above in the equal parameter for this widely used aluminum alloy. Microstructural Surveys were performed on three different roughness levels of the sample and the results obtained from the analysis of samples by optical microscope (OM), atomic force microscope (AFM) and Scanning electron microscopy (SEM) analysis showed that, increasing the surface roughness up to Ra = 0.16 micrometer, caused the greater degree of beam engagement by the surface grooves, hence more concentration of the beam photons and more melting obtained, so the depth of penetration increases by consuming a lower amount of energy.

Keywords: Surface roughness; Beam absorption; Pulsed Laser welding; penetration depth; Aluminum alloy.

Corresponding Author: h.naffakh-moosavy@modares.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-02]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.3.1]

شاپا:2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هشتم، شماره1، بهار و تابستان 1401

اثر زبری سطح بر هندسه جوش آلیاژ آلومینیم 1050 جوشکاری شده به روش لیزر Nd:YAG پالسی

میلاد فومنی، همام نفاخ موسوی*، علی رسولی، حسین علی یاری

گروه مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران.

دریافت مقاله: 1400/12/19 ؛ پذیرش مقاله: 1401/04/12

چکیده

زبری سطح در جوشکاری، از پارامترهای مهم در اتصال فلزات جوش داده شده به روش لیزر است که در جذب پرتوهای لیزر مستقیما اثرگذار است. هنگامی‌که پرتو لیزر به سطح فلزپایه تابیده می‌شود، زبری سطح نقش مهمی در میزان جذب پرتوها و میزان ذوب حاصل شده دارد و مستقیما روی عمق نفوذ جوش نهایی اثر می‌گذارد. هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر زبری ذکر شده در پارامترهای جوشکاری یکسان برای این آلیاژ پرکاربرد آلومینیم است. بررسی‌های ریزساختاری در سه سطح زبری مختلف نمونه انجام شد و نتایج به دست آمده از آنالیز نمونه‌ها توسط میکروسکوپ‌های نوری، نیروی اتمی و الکترونی روبشی نشان داد افزایش میزان زبری سطح تا اندازه Ra =0/16 میکرومتر، باعث افزایش میزان درگیری پرتوها می‌شود. در نتیجه میزان تمرکز بیشتری از پرتوها را خواهیم داشت و ذوب بیشتری در این حالت رخ می‌دهد و عمق نفوذ با صرف انرژی کمتر افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: زبری سطح، جذب پرتو، جوشکاری لیزر پالسی، عمق نفوذ، آلیاژ آلومینیم.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: h.naffakh-moosavy@modares.ac.ir

1- مقدمه

جوشکاری لیزر از روش‌های پیشرفته جوشکاری و اتصال فلزات به روش ذوبی است که با وجود متغیرهای ذاتی از نظر نوع و منبع پرتوی اعمالی از نظر پارامترهای جوشکاری نیز متغیرهای متعددی مثل سرعت جوشکاری، توان و فرکانس دستگاه در نوع و کیفیت اتصال نهایی اثرگذار خواهد بود. حالت ضربانی اعمال پرتو، متغیر جدیدی به نام مدت زمان اعمال پالس را به پارامترهای کنترل کننده اضافه می‌کند که مزیت‌های قابل توجهی به همراه دارد؛ با پالسی شدن پرتوی لیزر، به دلیل افزایش توان، عمق نفوذ افزایش می‌یابد و پالس‌های اولیه نیز به شروع تعامل بین پرتو و سطح مورد هدف کمک می‌کند. مدت زمان اعمال ضربان یا پالس برای یک جوشکاری لیزر با پرتو Nd:YAG عموما در محدوده 0/5 تا 20 میلی‌ثانیه در فرکانس 5 تا 500 هرتز است [1].

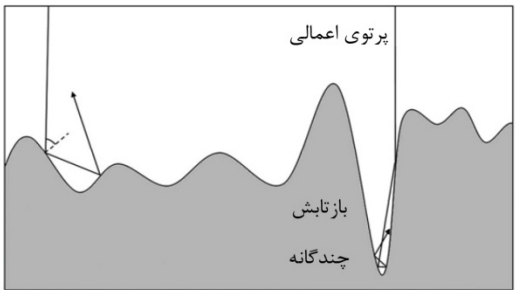
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-02]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.3.1]

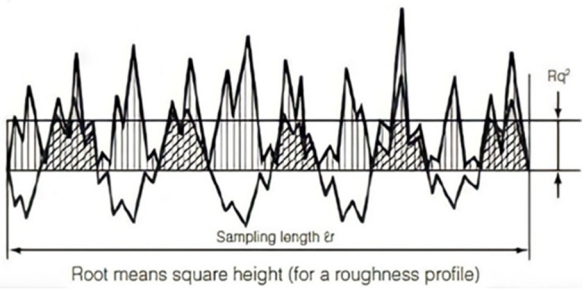
اصلی ترین دلیل موفقیت این لیزرها، امکان انتقال پرتو از لیزر به قطعه کار توسط فیبرنوری می‌باشد که موجب انعطاف‌پذیری بالای لیزر می‌شود. در طول دهه گذشته با وجود چالش‌های متعدد، توجه زیادی به جوشکاری لیزر آلیاژهای آلومینیم شده است. آلیاژهای مختلف آلومینیم به دلیل عناصر آلیاژی مختلفی که دارند جوش‌پذیری مختلفی از خود نشان می‌دهند؛ اما سری تجاری این آلیاژ به دلیل خواص ذاتی خود، با چالش‌های کمتری همراه است [2].

رسانش حرارتی آلومینیم در مقایسه با فولاد تقریبا سه برابر بیشتر است. این موضوع باعث شده آلومینیم به یک ماده مهم در کابردهای حرارتی و انجمادی مانند مبدل‌های حرارتی و جوشکاری تبدیل شود. در کنار مس، آلومینیم خالص دارای رسانایی الکتریکی کافی برای استفاده به عنوان رسانای الکتریکی است[3]. اما در مقایسه با فولاد ساده کربنی، آلومینیم دارای رسانش الکتریکی حدودا شش برابری می‌باشد در حالی‌که نقطه ذوب آن تقریبا نصف فولاد است. این موضوع موجب می‌شود اثر زبری سطح در جوشکاری لیزر این فلز به دلیل ذوب و انجماد سریع‌تر حوضچه جوش به نسبت فولاد کربنی، واضح‌تر باشد. علاوه بر این، با افزودن عناصر آلیاژی به این فلز، ضریب رسانش حرارتی آن کاهش می‌یابد[4]. در نتیجه برای این بررسی آلیاژ 1050 که سری تجاری این فلز محسوب می‌شود، انتخاب شد.

پرتوهای نوری که روی سطح فلزپایه فرود می‌آید، قسمتی از آن بازتابش، جذب و منتقل می‌شود. بخش جذب شده تابش الکترومغناطیس که با الکترون اتم‌های لایه‌های سطحی برهم‌کنش ایجاد می‌کند، به صورت ارتعاش و سپس گرما ظاهر می‌شود و باقی بازتابش می‌شوند. در کنار عوامل متعددی مانند طول موج، افزایش دما و حالت ماده در فلز پایه، زبری سطح (R_a) از عوامل تاثیرگذار در میزان جذب پرتوی لیزر اعمال شده به سطح است که از آن برای جذب و درگیری بیشتر پرتو با سطح استفاده می‌شود. پستی و بلندی‌های ایجاد شده فرصتی برای بازتابش‌های چندگانه پرتوی لیزر ایجاد می‌کند که این موضوع در شکل (1) نشان داده شده است. همچنین شکل (2) زبری متوسط سطح R_q یا R_{ms} ارتفاع مربع متوسط پیک‌ها[6] در هیستوگرام زبری سطح نمونه[6] را نشان داده شده است[7]. اگر میزان زبری سطح به گونه‌ای باشد که از طول موج لیزر کمتر باشد سطح صاف فرض می‌شود. سطوحی که به اصطلاح آینه ای باشند در اثر ذوب ناشی از جذب پرتو، بعد از انجماد، زبری بیشتری خواهند داشت[5]. در این تحقیق، اثر زبری سطح بر خصوصیات هندسی جوش آلومینیم (شامل عرض، عمق و نسبت آن‌ها) که توسط فرایند لیزر پالسی جوشکاری شده است مورد بررسی قرار گرفته و حدود بهینه زبری سطح برای بدست آوردن نفوذ بالاتر به دست آمده است.



شکل1- بازتابش چندگانه حین برخورد پرتو با پستی بلندی سطح.



شکل2- تعریف Rq یا Rms در هیستوگرام زبری سطح نمونه.

2- مواد و روش پژوهش

در این پژوهش از ورق آلومینیم 1050 با ضخامت 1/9 میلی‌متر، به عنوان فلزپایه استفاده شد. نتایج آنالیز تعیین ترکیب شیمیایی به روش ICP این ورق جهت شناسایی کامل عناصر و اطمینان از فلزپایه، در جدول (1) آمده است. برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت جوشکاری، ابتدا ورق با آب و سپس استون شستشو داده شد و برای دست‌یابی به زبری موردنظر، با استفاده از کاغذ سمباده‌های به ترتیب 2500، 800 و 120 سطوح مختلفی از زبری روی سطح سه نمونه از همان ورق ایجاد شد. در ادامه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-02]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.3.1]

جهت به دست آوردن پارامترهای زبری موردنظر، نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی شدند. پس از تعیین زبری سطح نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی، نمونه‌ها مطابق پارامترهای جدول (2) به صورت مهره‌جوش روی صفحه با دستگاه جوشکاری لیزر پالسی با توان اسمی 100 وات جوشکاری شدند.

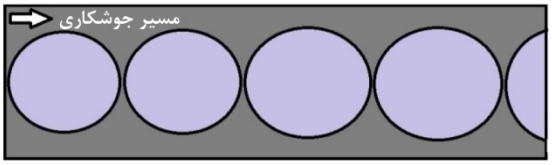
جدول 1- نتیجه بررسی آنالیز ICP ورق آلومینیم.

نوع عنصر آلیاژی	درصد عنصر
آلومینیوم	۹۹/۲۲
آهن	۰/۴۳
روی	۰/۱۲
وانادیم	۰/۰۳
نیکل	۰/۰۲
منیزیم	۰/۰۱

جدول2- پارامتر اجرا شده توسط دستگاه جوش لیزر پالسی.

متغیر	اندازه
سرعت (mm/s)	۱/۱
ولتاژ (V)	۴۷۰
فرکانس (Hz)	۱/۲
مدت زمان اعمال پالس (ms)	۳
سایز لکه (mm)	۱

انتخاب فرکانس 1/2 هرتز برای این فرایند، با این هدف بوده که پالس‌های اعمالی حداقل هم‌پوشانی روی سطح فلزپایه را با یکدیگر داشته باشند چرا که در فرایند ذوب و انجماد جوشکاری لیزر، ذوب ناشی از اعمال پرتوی لیزر پس از انجماد، علاوه بر اینکه موجب زبری سطح می‌شود[8]، در اثر برخورد با مذاب منجمد شده ناشی از پالس قبل (به اندازه سهم هم‌پوشانی)، عمق نفوذ متناسب با پالس اول را ندارد و درنتیجه عمق نفوذ متفاوتی ایجاد می‌کند. این موضوع برای درک بهتر در شکل (3) نشان داده شده است. آلومینیم دارای نفوذ حرارتی بالایی است، بنابراین هنگامی که انرژی کافی جذب می‌شود، به دلیل افزایش زبری سطح، گرما می تواند راحت‌تر از محل جذب اولیه پراکنده شود[9].



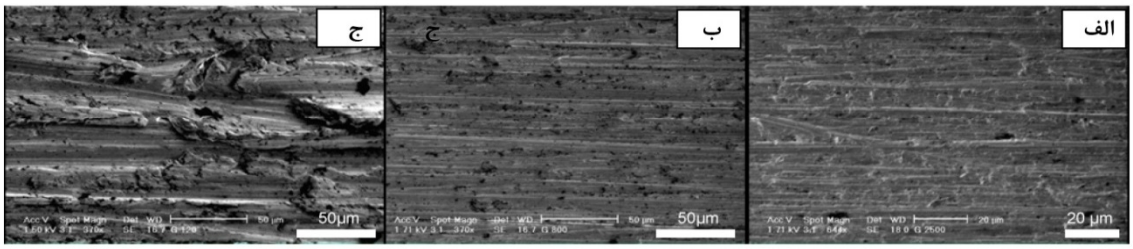
شکل3- شماتیکی از مهره‌های جوش اجرا شده با فرکانس 1/2 هرتز.

پس از جوشکاری نمونه‌ها با استفاده از اپوکسی، مانت سرد شدند. سپس سطح مقطع آلیاژ جوشکاری شده، مطابق استاندارد فرایند سمباده زنی و پولیش مکانیکی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و سپس با استفاده از محلول ($9ml\ H_2O+\ 1gr\ NaOH$) در مدت زمان 2 دقیقه، سطح نمونه‌ها حکاکی شیمیایی شدند. عکس‌برداری نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS انجام شده است. در ادامه آزمون ریزسختی سنجی ویکرز با نیروی 25 گرم نیرو به مدت زمان 15 ثانیه جهت بررسی تغییرات سختی انجام شد.

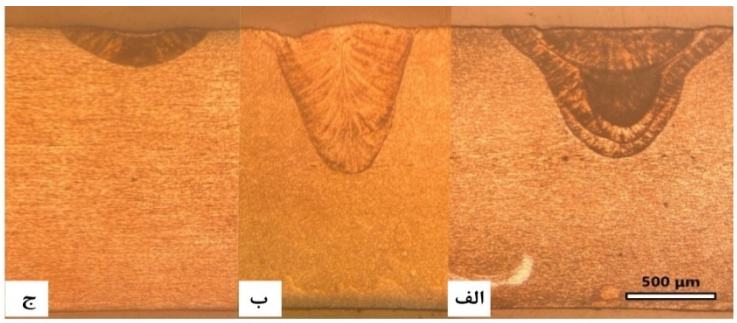
3- نتایج و بحث

نتایج حاصل از عکس‌برداری از سطح نمونه‌های سمباده زنی شده توسط میکروسکوپ الکترونی در شکل (4) به ترتیب آورده شده است. در شکل (5) نتایج آنالیز تصویری مقاطع جوش توسط میکروسکوپ نوری به ترتیب آمده است که درنمونه (الف)، پالس‌های اعمال شده پهن‌شدگی بیشتری روی فلزپایه از خود نشان دادند و در تصاویر این تفاوت قابل تشخیص است. در حالت (ب) و (ج) با افزایش زبری سطح، پهن‌شدگی پالس‌ها روی سطح یا به عبارتی عرض حوضچه به مراتب کاهش بیشتری یافت. همچنین داده‌های مرتبط با توپوگرافی و زیری بدست آمده، در جدول (3) آورده شده اند. جدول (4) نتیجه جوشکاری سه نمونه را به لحاظ مشخصات ابعادی حوضچه جوش نهایی برای درک بهتر نشان می‌دهد. با بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد با افزایش زبری تا $R_a = 0/16$ میکرومتر عمق نفوذ افزایش می‌یابد و با زبری بیشتر نمونه تا $R_a = 0/57$ میکرومتر عمق نفوذ شدیدا کاهش می‌یابد. در حالتی‌که سطح نمونه تا بالاترین شماره یعنی 2500

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-02]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.3.1]

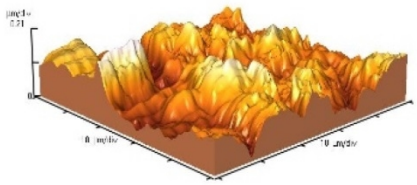
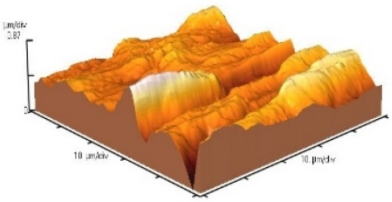
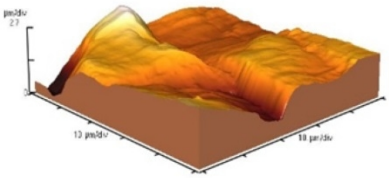


شکل4- سطح نمونه‌های آماده شده با سمباده‌های به ترتیب از راست به چپ الف- شماره 2500، ب- شماره 800 و ج- شماره 120



شکل 5- تصاویر متالوگرافی نمونه‌های به ترتیب با الف- Ra = 0,05 ب- Ra = 0,16 و ج- Ra = 0,57 میکرومتر با بزرگنمایی پنج برابر.

جدول3- نتایج بررسی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی.

نمونه	R_a (µm)	R_q (µm)	سطح نمونه
اول	۰/۰۵	۰/۰۶	
دوم	۰/۱۶	۰/۲۳	
سوم	۰/۵۷	۰/۷۴	

سمباده‌زنی شده باشد، سطح به اصطلاح آینه‌ای می‌شود. در نتیجه پرتوهای اعمالی درگیری کمی با شیارهای سطحی ایجاد می‌کنند و عمق نفوذ بالایی حاصل نمی‌شود. تصویر نهایی پالس اعمال شده روی این سطح در شکل (6) قابل مشاهده است. در نمونه دوم عرض حوضچه جوش به نسبت نمونه با سمباده 2500 کمتر شد چرا که پرتوها تمرکز بیشتری روی سطح پیدا کردند. در نتیجه عمق نفوذ بالاتری حاصل شد که در شکل (7) ظاهر پالس اعمالی آن نشان داده شده است.

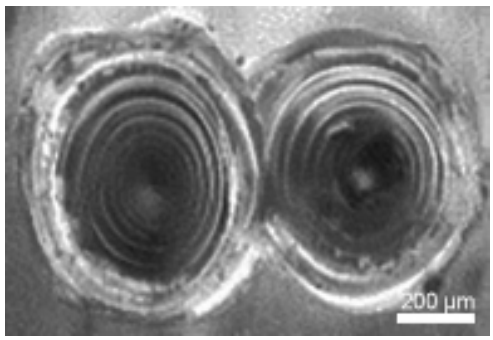
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-02]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.3.1]

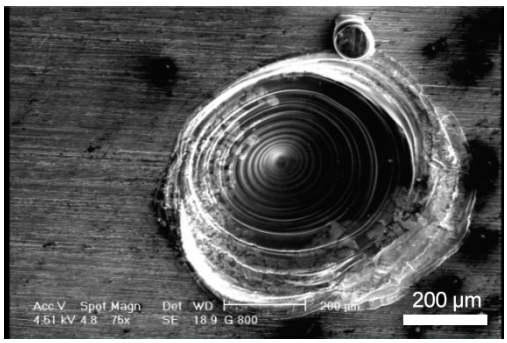
جدول4- مشخصات ابعادی حوضچه جوش در اثر تغییرات زبری سطح.

نمونه	زبری سطح (R_a)	عمق نفوذ حوضچه	عرض حوضچه	نسبت عمق به عرض حوضچه
اول	۰/۰۵	۰/۸۵	۱/۳۲	۰/۶۴
دوم	۰/۱۶	۰/۹۸	۰/۹۴	۱/۰۴
سوم	۰/۵۷	۰/۲۵	۰/۸۴	۰/۲۹

با عمیق‌تر شدن شیارهای سطح برای نمونه با زبری سمباده شماره 120، پستی و بلندی سطح نمونه به بیشترین مقدار مورد بررسی در این پژوهش رسید که جوشکاری آن با کاهش شدید در عمق نفوذ و عرض حوضچه همراه بود. در نتیجه پرتوهای اعمالی به میزان بیشتری از جوشکاری نمونه با سمباده شماره 2500 پراکنده شدند و جذب کمتری هم صورت گرفت، این تفاوت در ظاهر پالس‌های اعمالی نیز قابل تشخیص است که در شکل (6، 7 و 8) نشان داده شده است.

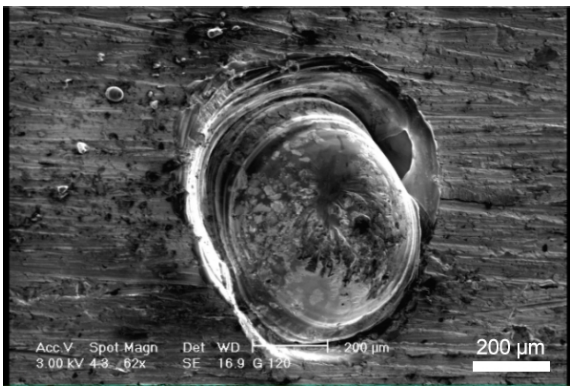


شکل6- تصویر میکروسکوپ الکترونی از پالس اعمالی روی نمونه با زبری سمباده شماره 2500.

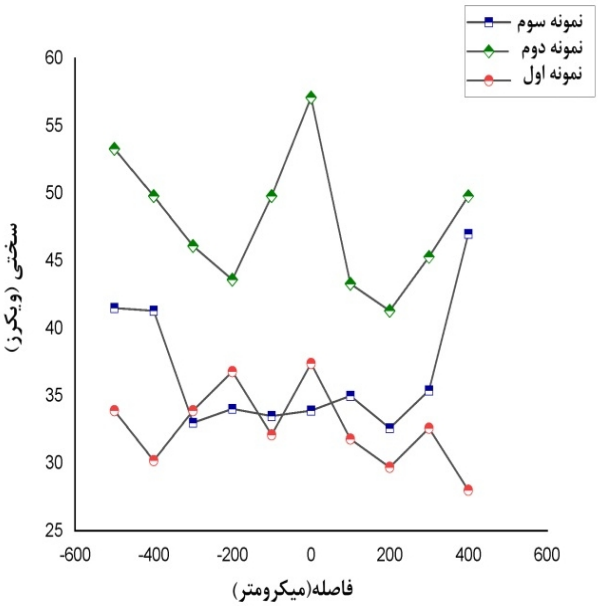


شکل7- تصویر میکروسکوپ الکترونی از پالس اعمالی روی نمونه با زبری سمباده شماره 800.

نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی ویکرز درشکل (9) نشان داد، بیشینه سختی با افزایش عمق نفوذ رابطه مستقیم دارد و با افزایش عمق نفوذ سختی هم افزایش پیدا می‌کند. همانطورکه گفته شد، از آنجایی که زبری سطح در نمونه دوم باعث ایجـــاد بیشترین حرارت ورودی و عمق نفوذ شده، به همان نسبت عرض منطقه‌ای که افت سختی پیدا می‌کند به نسبت دیگر نمونه‌ها بیشتر می‌شود. در نمونه سوم نیز، کمترین عمق نفوذ و کمترین نسبت عمق به عرض حوضچه (جدول 4)، باعث بیشترین یکنواختی و کمترین افت عرضی در پروفیل سختی آن می‌شود.



شکل8- تصویر میکروسکوپ الکترونی از پالس اعمالی روی نمونه با زبری سمباده شماره 120



شکل9- پروفیل سختی حاصل از میکروسختی سنجی سه نمونه.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-02]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.3.1]

4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر زبری سطح روی مشخصات هندسی جوش لیزر ورق 1050 آلیاژ آلومینیم بوده است. با اعمال پارامترهای جوشکاری یکسان روی سه نمونه با سه زبری سطح مختلف، سه ابعاد و شکل متفاوت از حوضچه جوش در فلزجوش ورق آلومینیم حاصل شد که این تفاوت‌ها در ابعاد ماکرو و میکرو قابل مشاهده است.

- هرچه زبری سطح ورق جوشکاری شده به میزان بهینه‌ای افزایش می‌یابد و به R_a=0/16 میکرومتر نزدیک می‌شود، نسبت عمق به عرض حوضچه جوش بیشتر می‌شود و پس از آن با افزایش بیش از حد زبری، عمق نفوذ به دلیل پراکندگی بیش از حد پرتوها شدیدا کاهش می‌یابد.

- میزان بیشینه سختی با افزایش عمق نفوذ رابطه مستقیم دارد، با افزایش عمق نفوذ و افزایش نسبت عمق به عرض حوضچه، سختی افزایش می‌یابد.

منابع

1-Laser welding, a practical guide, Christopher Dawes, CEng.

2-AMADA, “Laser Welding Fundamentals”, www.amadaweldtech.com, 2020.

3-www.azom.com, Aluminum: specifications, properties, classifications and classes, 2005

4-Laser welding of light metal alloys: aluminum and titanium alloys, J. M. SÁNCHEZ AMAYA, Titania, Ensayos Y Proyecto Industrials S.L, Spain, 2013.

5-Study the Effect of Changing the Surface Roughness and the Laser Focus Distance to the Aluminum Appearance using Picosecond Laser. F.qahtani, 2019.

6-ASME B46.1, Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay, 2019.

7-ISO 4287:1997, Profile method Terms, definitions and surface texture parameters.

8- Influence of process parameters on kerf geometry and surface roughness in Nd:YAG laser cutting of Al 6061T6 alloy sheet, C. Leone, 2016.

9-Effect of Surface Roughness on CO2 Laser Absorption by 316L Stainless Steel and Aluminum, M. Ahmed Obeidi, E. McCarthy, 2019.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-01-02]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.3.1]